

Chapitre 9

Agriculture de précision

A. Jullien, P. Huet

Version provisoire

9.1. Introduction

L'agriculture de précision (AP) vise à adapter les pratiques culturales à l'hétérogénéité intra-parcellaire du sol et des cultures. Cette adaptation a toujours été d'usage pour certaines cultures peu mécanisées comme les cultures fruitières pour lesquelles les traitements de taille ou de récolte, par exemple, peuvent être adaptés à chaque plant (verger, vigne, bananeraie). Pour les grandes cultures (blé, maïs, soja...), la mécanisation croissante de l'agriculture et la recherche d'une productivité maximale ont conduit à traiter de manière synchrone et homogène des parcelles de plus en plus grandes. Cependant, les avancées technologiques récentes sur la mesure et le traitement de l'information spatialisée ont révélé une hétérogénéité spatiale parfois importante au sein de ces parcelles concernant à la fois le milieu physique et les rendements.

En 1983, deux chercheurs de l'Université du Minnesota utilisent une carte d'acidité des sols pour moduler les apports d'amendements calciques sur une parcelle et créent ainsi le concept d'agriculture de précision ([THE 99] ; [RIC 02b]). Au début des années 90, aux Etats-Unis, l'utilisation des capteurs de rendement couplés à un GPS (Global Positioning System) permet de réaliser les premières cartes de rendement (1993). A l'heure actuelle le terme générique « Agriculture de précision » désigne l'ensemble des techniques culturales basées sur l'utilisation des nouvelles technologies de mesure et de traitement de l'information spatialisée. On dénombre aux Etats-Unis 31 000 capteurs de rendement pour 10 millions d'hectares cartographiés. En Europe, les premières cartes de rendement apparaissent en 1997.

2 Titre de l'ouvrage

L'essor des nouvelles technologies et de l'AP y est plus lent. On compte aujourd'hui en France 150 systèmes de cartographie du rendement (capteur + GPS).

Les objectifs affichés de l'AP sont d'augmenter la rentabilité de la production (réduction des intrants) et d'en limiter les impacts environnementaux en ajustant « au mieux » les apports d'intrants aux besoins de la culture. Le principe de la démarche est le suivant : les propriétés du sol (teneur en matière organique, réserve utile, pierrosité...) conditionnent pour partie la croissance et le rendement de la culture (rendement potentiel). Les pratiques culturales (densité de semis, fertilisation, traitements phytosanitaires...) sont raisonnées en fonction de ces propriétés. Si les caractéristiques du sol sont hétérogènes sur une parcelle, il convient en conséquence de moduler les pratiques en fonction de cette hétérogénéité (Figure 9.1).

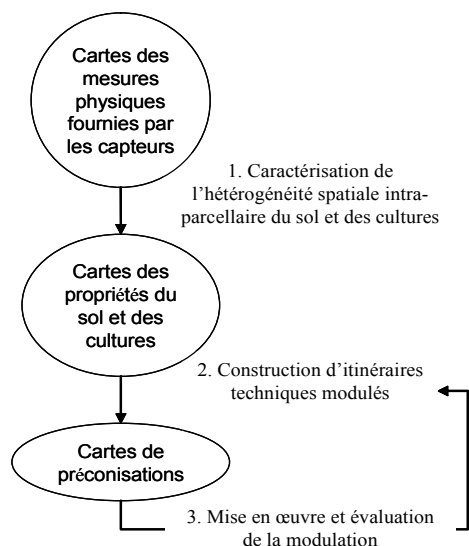


Figure 9.1. Les étapes de la démarche d'agriculture de précision

Cependant, le rendement final dépend également des interactions multiples avec de nombreux autres facteurs tels que le climat, les maladies ou les techniques culturales dont il faut tenir compte. L'effet de ces interactions est accessible par la mesure de l'hétérogénéité du couvert végétal en cours de culture. Pour moduler les pratiques culturales il est donc nécessaire dans un premier temps de mesurer précisément les hétérogénéités spatiales du sol, du couvert et du rendement. Nous

verrons dans une première partie quels sont les outils disponibles pour caractériser cette hétérogénéité. Dans une deuxième partie nous verrons comment ces informations sont mobilisées et combinées entre elles en fonction de la stratégie de modulation choisie par l'agriculteur. Dans une troisième partie, nous étudierons la construction d'itinéraires techniques modulés (identification du ou des facteurs limitants à l'origine des hétérogénéités spatiales, intégration à l'échelle de l'ensemble de l'itinéraire technique et du système de culture). Nous considérerons ensuite dans une quatrième partie les problèmes liés à la mise en œuvre et à l'évaluation des pratiques culturales modulées.

9.2. Les outils de mesure de l'hétérogénéité intra-parcellaire du sol et des cultures

Les outils de mesure disponibles sont nombreux et divers. Les capteurs issus du développement des nouvelles technologies constituent une source d'information abondante. Leur avantage est de fournir une information quantitative sur l'ensemble de la parcelle dont la mesure non destructrice est facilement répétable dans le temps. Leur limite est de ne proposer qu'une estimation des variables à mesurer (mesure indirecte) qu'il va falloir par la suite interpréter (voir § 9.4.). Les outils classiques (mesures directes selon un plan d'échantillonnage systématique), même si ils sont lourds, coûteux et destructifs restent utilisés car ils fournissent une mesure directe des variables permettant, entre autre, de calibrer les mesures des capteurs. La spatialisation des informations consiste à géoréférencer les points de mesure sur la parcelle au moyen d'un GPS. Les données sont ensuite intégrées dans des systèmes d'information géographiques (SIG) permettant un traitement informatique de l'information (**Figure 9.2**)

9.2.1. Caractérisation des hétérogénéités du rendement

Le rendement est calculé par le débit de grains divisé par le produit de la vitesse d'avancement de la moissonneuse-batteuse et de la largeur de la barre de coupe. Le débit de grains est mesuré par un capteur d'impact ou par un faisceau lumineux (mesure du degré d'obturation du faisceau, [REY 02]). Ces capteurs d'abord développés sur céréales ont ensuite été adaptés à d'autres cultures comme le coton, le maïs, la vigne (cf. www.nespal.cpes.peachnet.edu et www.terre-net.fr). Des avancées technologiques devraient voir le jour concernant d'une part la mesure du rendement pour la pomme de terre, la betterave et les fourrages et d'autre part la mesure de la qualité des produits récoltés (teneur en protéine, en huile).

9.2.2 Caractérisation des hétérogénéités du sol

- Les mesures directes par sondage du sol restent indispensables notamment pour la mesure **des caractéristiques permanentes du sol** (profondeur de sol, nature et texture des sols, pierrosité...).

- Les **photographies aériennes** (Figure 9.2) fournissent une information initiale d'acquisition simple pour appréhender l'hétérogénéité du milieu notamment sur sol nu (les différences de couleur peuvent traduire des différences de nature, texture ou profondeur de sol).

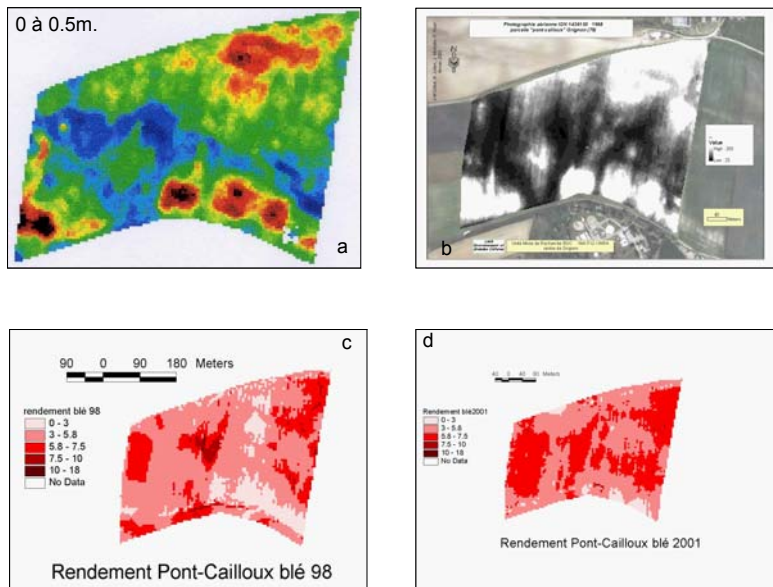


Figure 9.2. Cartographie d'une parcelle de la ferme expérimentale de Grignon (Yvelines, France). a) résistivité électrique sur 0 à 0.5m juillet 2002 b) photographie IGN sur sol nu 1968 c) et d) cartographie du rendement sur blé en 1998 et 2001

- Les **méthodes géophysiques** consistent à envoyer une onde électrique (carte de résistivité électrique) ou électromagnétique dans le sol puis à en mesurer la modification après son passage dans les différentes couches du sol [NIC 99]. Ces mesures donnent des informations en profondeur sur la teneur en argile [DAB 95], la granulométrie, la densité apparente et l'humidité des sols [DOU 00].

Des informations sur les caractéristiques de sol sont également accessibles par **radiomètres et radars** (rugosité, humidité, matière organique...). Cependant, ces méthodes de mesure sont plutôt utilisées pour la caractérisation des couverts et seront en conséquences détaillées dans le paragraphe suivant.

9.2.3. Caractérisation des hétérogénéités du couvert végétal en cours de culture

Les caractéristiques du couvert (surface foliaire, contenu en azote, contenu en eau...) peuvent être mesurées directement ou estimées à partir d'une mesure de leurs propriétés optiques au moyen de radiomètres et de radars. Ces capteurs permettent d'obtenir des images numériques de la cible, c'est à dire de la surface visée par le capteur, dans une gamme de longueurs d'ondes spécifique. La plupart de ces capteurs mesurent la réflectance de la cible, certains mesurent également la transmittance, l'émittance ou la fluorescence. Des descriptions détaillées de leur fonctionnement et de leur utilisation en AP ont été faites ([GUE 01] ; [SAR 00] ; [CNE 00] ; [DOU 00]).

Le signal émis, réfléchi ou transmis par le couvert dans les différentes longueurs d'ondes du spectre (signature spectrale) est corrélé aux variables biophysiques qui le caractérisent. Les caractéristiques principales du couvert (notamment la surface foliaire et la teneur en azote des feuilles) sont accessibles dans le domaine solaire, du visible au moyen-infrarouge. Il existe différents supports ou vecteurs pour effectuer les mesures. Les capteurs peuvent être fixés sur un engin agricole (capteurs embarqués), sur un avion ou un drone (capteurs aéroportés) ou encore sur un satellite. Lorsque le capteur est porté par un vecteur éloigné de la cible (avion, drone, satellite) on parle de télédétection.

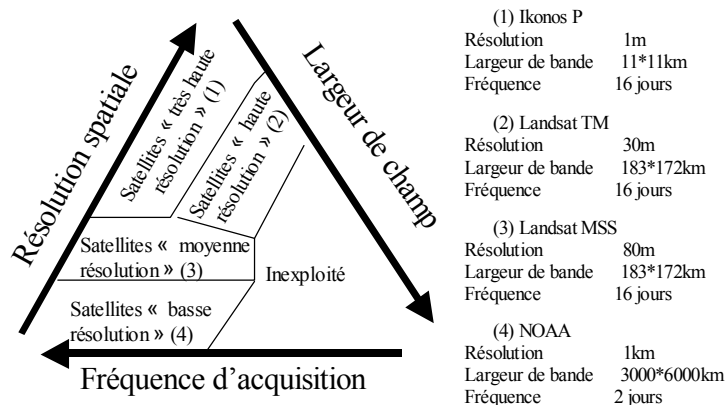


Figure 9.2. Relation entre fréquence d'acquisition, résolution spatiale et largeur de champ et positionnement des satellites actuels (sources : www.geosys.fr)

Les images satellites sont aujourd'hui fournies par une dizaine de satellites civils ([CNE 00]; [ROU 02a]; [ROU 02b]) via le Net où la vente en ligne est assurée par des sociétés de service (www.earthscan.com; www.mapshot.com; www.geosys.fr). Les images sont caractérisées par trois variables liées (**Figure 9.3**) : la fréquence d'acquisition, la résolution spatiale et la taille de l'image (largeur de bandes). Pour l'AP, il est nécessaire de disposer d'images ayant une bonne résolution spatiale (satellites à très haute ou haute résolution de l'ordre de quelques mètres) et une fréquence d'acquisition hebdomadaire pour assurer le suivi des cultures. Or, l'acquisition d'images par télédétection est dépendante des conditions météorologiques (pas d'acquisition en cas de nébulosité). Pour obtenir une image utilisable par semaine, il faut un satellite ayant une fréquence de passage de 2 ou 3 jours. Ces conditions ne sont pas remplies à l'heure actuelle et le coût d'acquisition des images en France (de 1 à 10k€ pour une image satellite en fonction de la taille de la scène et de la résolution spatiale) est également un facteur limitant à leur utilisation. Les capteurs aéroportés offrent une plus grande latitude dans le choix des dates d'acquisition. L'utilisation de drones, par exemple, est peu coûteuse et facile [RIC 02a].

Les informations fournies par les capteurs de mesure (réflectance, résistivité électrique...) sont abondantes et complémentaires des méthodes de mesures classiques (sondages, mesures directes). La manière dont l'agriculteur mobilise (et trie) ces informations dépend de sa stratégie de mise en œuvre.

9.3. Les stratégies et choix tactiques

9.3.1. Agriculteur consommateur ou acteur

Pour la mise en œuvre de la modulation, des services en ligne sur le Net se développent pour l'aide à l'interprétation des cartes et à la modulation [HEB 02]. Ainsi, la société Crystal Sugar (<http://www.crystalsugar.com>) propose une cartographie des parcelles à partir d'images satellites accompagnées de préconisations pour le zonage et la modulation des apports azotés. Des services équivalents existent également en France pour le blé et l'orge, grâce au projet Farmstar issu d'une collaboration entre Astrium, Geosys et Arvalis. A partir d'images de réflectance des parcelles obtenues par capteurs aéroportés en cours de culture, la biomasse et le statut azoté du couvert sont estimés. Des cartes de

prévision sur le risque de verse mécanique (chute des plantes), le rendement, la teneur en protéine des grains ainsi que des cartes de préconisations de fertilisation azotée en sont déduites. Ces services sont vendus par les coopératives sous forme d'abonnement. Un millier d'agriculteurs en France utilisent ce service d'informations sur leurs parcelles même s'ils ne pratiquent pas de modulation intra-parcellaire [VIN 03]. Cette stratégie présente pour l'agriculteur une certaine facilité d'utilisation puisqu'il n'a pas à s'investir dans l'acquisition et l'interprétation des données. Il se positionne en consommateur. L'inconvénient est qu'il n'est alors pas propriétaire des informations et n'a pas de contrôle sur leur exploitation et leur interprétation.

La deuxième possibilité pour l'agriculteur est d'investir financièrement et en temps dans l'achat du matériel d'acquisition et le traitement de l'information spatialisée. L'avantage pour lui, est d'assurer son indépendance et un contrôle sur l'information. Il peut également mettre à profit sa connaissance d'expert dans l'interprétation des résultats (connaissance du milieu, des parcelles et de l'appareil de production) mais a alors besoin d'aide technique pour l'exploitation des données. Pour répondre à ces besoins, des programmes de développement voient le jour, regroupant une dizaine d'agriculteurs et soutenus par des chambres d'agriculture (Eure et Loire) ou des coopératives (Epis Centre). Ces programmes se concrétisent par le financement d'investissements matériels (par des CTE, par exemple) et la mutualisation des résultats [BAR 03b].

9.3.2. Modulation directe, modulation indirecte

Le point de départ en AP pour un agriculteur, est d'établir des cartes de rendement sur ces parcelles. Ces cartes, en tant que telles, apportent à l'agriculteur une information sur ses rendements et leur variabilité beaucoup plus précise qu'auparavant. Le choix de la modulation ou non se fait en fonction du niveau d'hétérogénéité observé et selon deux stratégies différentes : la modulation directe ou indirecte.

9.3.2.1. Modulation indirecte

Cette stratégie consiste à utiliser toutes les informations des années précédentes pour construire la modulation de l'année suivante. Pour cela, l'agriculteur doit réaliser un zonage de la parcelle à partir de la carte détaillée des sols. Il est conseillé à l'agriculteur d'effectuer un pré-zonage à partir de carte géologique, photo aérienne, carte de résistivité...en repérant des sous-ensembles homogènes dans la parcelle (**Figure 9.2**). Les limites des zones pourront être affinées par des sondages et des analyses pédologiques selon un plan d'échantillonnage ciblé sur la parcelle. Chaque zone correspondra à une unité cartographique de sol définie par ses propriétés spécifiques. Sur chaque zone, considérée comme une parcelle homogène,

8 Titre de l'ouvrage

l'itinéraire technique (dose de semis, fertilisation ...) sera raisonnée en fonction de ses caractéristiques en utilisant les outils classiques de l'agronomie (par exemple la méthode du bilan pour la fertilisation azotée [MEY 96]).

9.3.2.2 Modulation directe

Cette stratégie consiste à utiliser des informations sur la culture en cours pour moduler les pratiques culturales en temps réel. Par exemple, des systèmes radiométriques embarqués (ex : appareil Hydro N-Sensor commercialisé par la société Norsk Hydro, www.hydro.com) ont été mis au point pour piloter en temps réel la fertilisation azotée des cultures à partir d'une estimation du statut azoté du couvert par mesure de leur réflectance dans le rouge et le proche infrarouge.

Modulation directe et indirecte ne sont pas incompatibles. Par exemple, dans le cas de la fertilisation azotée, l'agriculteur peut calculer les doses d'azote total à apporter sur chaque zone par modulation indirecte (selon un rendement potentiel lié aux caractéristiques du sol) puis moduler le deuxième apport d'azote par modulation directe en fonction des hétérogénéités du couvert (prise en compte des facteurs limitants autres que les propriétés du sol conditionnant la croissance de la culture).

9.4. La construction d'itinéraires techniques modulés

9.4.1 Identification des facteurs limitants à l'origine de la variabilité intra-parcellaire des rendements

Pour moduler les techniques culturales, il convient d'identifier le ou les facteurs limitants à l'origine de la variabilité intra-parcellaire des rendements. Il faut donc pouvoir interpréter les informations fournies par les capteurs sur le sol et le couvert. Prenons l'exemple de la modulation du 2^{ème} apport d'N sur blé en fonction du statut azoté du couvert estimé par sa réflectance (Hydro N Sensor, service Farmstar). L'apport d'azote doit être déclenché lorsque que la teneur en azote du couvert est inférieure à une teneur en azote critique. Les mesures de réflectance donnent une estimation de l'indice de surface foliaire et du contenu en azote du couvert à partir desquels la teneur en azote du couvert est calculée [HOU 01]. Or les indicateurs radiométriques utilisés peuvent réagir à d'autres stress que la carence azotée comme les stress hydrique, les maladies ou la présence de mauvaises herbes d'où un risque de confusion d'effets. L'utilisation de ces outils nécessitent donc d'être paramétrables et calées localement à chaque utilisation. Dans le cas de l'Hydro N Sensor, c'est l'agriculteur qui réalise le calage spécifique à ses parcelles. Dans le cas du service Farmstar, c'est Astrium et Arvalis qui réalisent les campagnes de calage chaque année pour les abonnés. Cette étape d'identification des facteurs limitants reste l'étape limitante principale de l'AP. Le problème réside dans le manque de spécificité de la plupart des capteurs dont la mesure intègre l'effet de plusieurs

facteurs du milieu. Dans le cas de la fertilisation azotée, le risque peut être d'augmenter la dose d'engrais azoté pour un couvert dont la teneur en azote estimée est faible alors que le facteur limitant est le stress hydrique. Dans ce cas, on n'améliore pas le rendement et on augmente le risque de pollution ultérieure par lessivage des nitrates excédentaires. Pour limiter ce risque il est important de croiser les différentes sources d'informations sur la parcelle (par exemple, réserve utile du sol) et de valoriser les connaissances d'expert des agriculteurs sur le milieu.

9.4.2. Nécessité de raisonner l'ensemble du système de culture

La modification d'un point de l'itinéraire technique (ITK), défini comme la suite logique et ordonnée dans le temps des opérations effectuées sur une parcelle [MEY 01a], peut avoir des conséquences sur l'ensemble de l'ITK. Ainsi, dans une zone à faible potentiel de rendement, si l'agriculteur choisit de diminuer la densité de semis, la biomasse du couvert végétal sera plus faible, ses besoins en azote et les risques de problèmes phytosanitaires seront en conséquence réduits [BAR 03b]. C'est donc tout un ITK de type extensif à bas niveau d'intrants qui sera réalisé sur cette zone. D'autres facteurs, classiquement pris en compte en agronomie, comme l'effet de la culture précédente, devront être intégrés dans le raisonnement de la modulation des pratiques. L'AP n'est pas un mode de conduite des cultures indépendant, mais un outil supplémentaire de raisonnement des ITK qui s'appuie sur les outils classiques de l'agronomie.

Les systèmes de culture répondent également à une logique globale à l'échelle de l'exploitation agricole [MEY 01a]. Introduire une modification de l'itinéraire technique sur une parcelle (date et nombre d'interventions) peut générer des problèmes d'organisation du travail [MAR 00]. De plus, l'hétérogénéité spatiale de la culture, peut être la résultante d'une hétérogénéité de développement de la culture et donc d'une différence d'âge des plantes entre zones. Selon la logique de la démarche d'AP, ces zones devraient être traitées (fertilisation, récolte...) à des moments différents. Or il semble exclu de planifier plusieurs passages pour une même opération sur une parcelle, ce qui constitue *in fine* une limite à l'AP.

9.5. Mise en œuvre et évaluation de la modulation des pratiques

Le développement de l'AP a donné un nouvel essor au machinisme agricole. L'offre en matériel permet de réaliser des modulations sur la densité de semis, la fertilisation, le désherbage et l'irrigation ([BOI 01], [BAR 03a]). La plupart des moissonneuses batteuses fabriquées actuellement sont équipées d'un système de mesure du rendement. Des innovations ont également lieu sur le plan informatique concernant l'enregistrement des informations spatialisées au champ (informatique

10 Titre de l'ouvrage

embarquée, [BIT 03]) et leur transfert dans des systèmes d'information géographique adaptés à la gestion des exploitations agricoles. Maintenant, l'agriculteur peut préparer la modulation de ses pratiques sur informatique et transmettre les consignes de modulation à l'ordinateur de bord du tracteur au moyen d'une simple disquette ou carte PCMCIA. Les progrès vont dans le sens d'une plus grande compatibilité entre les outils informatiques mis au point par les différents constructeurs.

La faisabilité et la rentabilité de la modulation sont deux critères principaux d'évaluation de l'AP. Par exemple, l'analyse de l'hétérogénéité du milieu peut conduire à un nombre de zones important sur une même parcelle. Faut-il considérer autant d'unités de gestion? Le nombre et la taille des unités de gestion sur la parcelle doivent tout d'abord être en adéquation avec les caractéristiques techniques des engins agricoles. En effet, la largeur des outils varie entre 3 et 24m et leur inertie longitudinale de 1 à 10m. Définir des zones de taille inférieure à ces valeurs serait donc aberrant. De plus, augmenter le nombre d'itinéraires techniques sur une parcelle augmente le risque d'erreur ainsi que le temps et le coût de réalisation des travaux sans amélioration systématique de la marge brute ([KIL 01]; [THR 99]). Il convient donc de trouver un optimum entre précision et faisabilité.

La rentabilité de la modulation reste difficile à évaluer. Les investissements nécessaires au départ sont importants : le matériel de cartographie du rendement coûte environ 15 000 euros (avec logiciel informatique pour traiter l'information), une carte de résistivité revient à environ 100 euros/ha, le service Farmstar coûte 90 euros par parcelle suivie plus 5 euros/ha. Pourtant, des études ([BAR 03b]; [RIC 02a]; [VIN 03]) présentent des exemples d'effets bénéfiques de la modulation sur la rentabilité des exploitations agricoles, et les utilisateurs portent un avis global positif sur les apports des nouvelles technologies appliquées à l'agriculture.

Les calculs de la rentabilité économique de l'AP prennent généralement en compte le coût de la technique, le rendement, l'économie d'intrant réalisée et le cours des produits ([HAR 97]; [PRA 98]). D'autres facteurs comme l'impact environnemental des cultures ou la qualité des produits sont plus rarement considérés du fait des difficultés liées à leur quantification. Or, si l'AP ne permet pas un gain évident de rendement, son développement dans le cadre d'une agriculture durable peut être favorisé. Pour cela, il importe de mettre au point des critères d'évaluation pertinents de l'impact environnemental des cultures afin de pouvoir juger de l'effet d'un meilleur ajustement des intrants aux besoins des cultures à l'échelle intra-parcellaire. C'est au moyen de ces critères que l'agriculteur pourra justifier de ses pratiques [MEY 01b].

9.6. Conclusion

L'AP est un concept encore récent dont les différentes étapes (**Figure 9.1.**) connaissent un degré d'avancement hétérogène. La partie technique (mise au point de capteurs et d'engins agricoles adaptés) est la plus aboutie du fait d'un fort intéressement de sociétés privées. En revanche, l'agriculteur reste encore démuné pour exploiter les informations disponibles. Le risque d'erreur dans l'interprétation n'est pas négligeable. Il est en partie dû à un manque de spécificité de certains capteurs (radiométrie, résistivité...) et d'adéquation entre l'information proposée et celle nécessaire au diagnostic agronomique. De plus, la plupart des travaux ont porté sur la modulation de la fertilisation azotée et dans une moindre mesure, de l'irrigation. Le désherbage, les traitements phytosanitaires sont moins étudiés du fait de la complexité des phénomènes à prendre en compte, mais également par un manque de capteurs spécifiques.

Les travaux de recherches en cours devraient permettre de lever à terme certaines limites. Les nouvelles questions posées aux agronomes portent sur portent notamment sur le passage des mesures des capteurs aux indicateurs agronomiques. Des recherches portent sur l'utilisation des mesures fournies par la télédétection dans les modèles de culture intégrant les interactions entre différents facteurs limitants (sol, climat...). Ces modèles permettent de représenter l'évolution dans le temps des hétérogénéités de croissance de la culture, mais nécessitent toutefois d'être adaptés aux échelles d'espace de l'AP ([LOS 01] ; [GUE 96] ; [MOU 98]). Des travaux portent également sur la construction d'outils d'évaluation des systèmes de culture modulés. Ces outils doivent représenter le système de culture dans son ensemble du point de vue de sa pertinence agronomique, de sa faisabilité, de sa rentabilité économique et de son impact environnemental, tout en restant suffisamment simples pour être utilisés par les agriculteurs.

Enfin, en dehors de la modulation, l'AP présente une plus-value non négligeable pour l'agriculteur justifiant l'essor actuel de cette technique (beaucoup utilisent l'information spatialisée sans faire de modulation). En effet, les informations produites par les techniques de l'AP peuvent être utilisées à d'autres fins que la seule modulation des pratiques culturales : l'information spatialisée est par exemple exploitable pour effectuer simplement un diagnostic agronomique ou environnemental sur une parcelle (identification des zones de verse ou de la présence de maladies...). La cartographie peut également servir à comparer différentes techniques sur une parcelle (doses, variétés...) ou différentes parcelles entre elles. Mais, dans un cadre plus large, l'AP est aussi un support d'échange d'informations entre les acteurs. A ce titre, l'AP représente pour l'agriculteur un moyen de répondre aux exigences sociétales en terme de respect de l'environnement, qualité des produits ou traçabilité [MAS 02]. Par exemple, le système embarqué sur tracteur (ordinateur + GPS) permet d'enregistrer l'itinéraire technique suivi par l'agriculteur en chaque zone de la parcelle [BIT 03]. Il peut ainsi associer à chaque récolte un mode de production. L'ensemble de ces informations

est un moyen pour l'agriculteur de justifier de ses pratiques auprès de ses partenaires. Il est pour cela important qu'il garde la maîtrise de l'exploitation et de la diffusion de cette information susceptible de lui donner un poids nouveau dans les négociations avec les acteurs du monde agricole.

Bibliographie

[BAR 03a] Baratte E. *Sur de nouvelles pistes technologiques. Dossier Agriculture de précision. Réussir Céréales Grandes Cultures (157)*, 2003

[BAR 03b] Baratte E. E. Le Duc. *"Etre rentable pour s'autofinancer". Dossier Agriculture de précision. Réussir Céréales Grandes Cultures (157)*, 2003

[BIT 03] Biteau J. J., D. Lucas, M.-H. Vincent C. Gloria. *Equipements optionnels, mais de plus en plus compatibles. Dossier Agriculture de précision. Réussir Céréales Grandes Cultures (157)*, 2003

[BOI 01] Boisgontier D. J. P. Hebrard. *Agriculture de précision. Les matériels et nouvelles solutions disponibles. Perspectives agricoles (271)*, 2001

[CNE 00] CNERTA *Téledétection et gestion du territoire. Document de cours. Chapitre II Rayonnement et capteurs. Généralités*, CNERTA, 2000

[DAB 95] Dabas M., O. Duval B. Verbèq. *Cartographie électrique en continu: apport à la connaissance d'une couverture de sol développée sur matériaux deltaïques. Etude et gestion des sols 2 (4)*, 1995

[DOU 00] Douzals J. P. *Mesures physiques de la variabilité des sols en agriculture de précision. Ingénieries EAT (24)*, 2000

[GUE 01] Guérif M., F. Baret, S. Moulin A. Bégué. *Téledétection, hétérogénéité parcellaire et gestion spatialisée des interventions techniques. Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. E. Malézieux, G. TrébuilM. Jaeger, Editions CIRAD et INRA*, 2001

[GUE 96] Guérif M., D. Courault N. Brisson. *Assimilation de données de téledétection dans les modèles de fonctionnement des cultures. Actes de l'école chercheurs INRA en*

bioclimatologie Le Croisic, 25-29 mars 1996. Tome 2 : du couvert végétal à la région, INRA. 2, 1996

[HAR 97] Harris D. *Risk management in precision farming*. First European Conference on Precision Agriculture, Warwick, UK, BIOS Scientific Publishers Limited, 1997

[HEB 02] Hébrard J. P. *Vers une offre de produits packagés facile d'emploi*. L'Internet agricole et Nouvelles Technologies (Hors série. Comment les agriculteurs américains utilisent au quotidien les nouvelles technologies), Juillet-Août 2002

[HOU 01] Houlès V., M. Guérif, B. Mary, J. M. Machet S. Moulin. *Do crop characteristics available from remote sensing allow to determine crop nitrogen status?* IIIrd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, France, 2001

[KIL 01] Killian B. *Economic aspects of precision agriculture: an economic assessment of different site-specific N-fertilization approaches*. Third European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, France, AgroMontpellier Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 2001

[LOS 01] Lo Seen D., M. Arreola, A. Clopes, E. Scopel A. Bégué. *Coupler modèle agronomique et système d'information géographique*. Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. E. Malézieux, G. TrébuilM. Jaeger, CIRAD et INRA 2001, 2001

[MAR 00] Martin P. C. Aubry. *Précision en agriculture et contraintes de production ou comment concilier horloge et boussole*. Colloque AFGR Précision des pratiques agricoles et environnement. Actes du colloque, Rennes, 2000

[MAS 02] Massé J. J. P. Hébrard. *Les outils et les enjeux de la traçabilité*. Perspectives agricoles (275), 2002

[MEY 01b] Meynard J. M. *Maîtrise des impacts environnementaux de l'agriculture : les démarches de l'agronome*. Cinquièmes rencontres de la fertilisation raisonnées et de l'analyse de terre. Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée, Blois, France, 2001

[MEY 01a] Meynard J. M., T. Doré R. Habib. *L'évaluation et la conception de système de culture pour une agriculture durable*. Académie de l'Agriculture Française. Colloque Olivier de Serres 28-30 septembre 2000 87 (4), 2001

[MEY 96] Meynard J. M., E. Justes, J. M. Machet S. Recous. *Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ*. Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Les Colloques N° 83, Reims, France, INRA, Paris 1997, 1996

[MOU 98] Moulin S., A. Bondeau R. Délécolle. *Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scale*. International Journal of Remote Sensing 19 (6), 1998

[NIC 99] Nicoullaud B., D. King A. Dorigny. *Variabilité des sols et techniques de cartographie détaillée*. Salon international du machinisme agricole. L'enjeu français de l'agriculture de précision. Hétérogénéité parcellaire et gestion des intrants, Paris, 1999

[PRA 98] Prato T. C. Kang. *Economic and water quality effects of variable and uniform application of nitrogen*. Journal of the American Water Resources Association 34 (6), 1998

14 Titre de l'ouvrage

- [REY 02] Reyns P., B. Missotten, H. Ramon J. De Baerdemaeker. *A review of combine sensors for precision farming*. Precision Agriculture 3 (2), 2002
- [RIC 02a] Richard R. *Les parcelles vues des drones*. L'Internet Agricole et Nouvelles Technologies (7), Juillet 2002
- [RIC 02b] Richard R. *Une incidence positive sur la rentabilité des exploitations*. L'Internet agricole et Nouvelles Technologies (Hors série. Comment les agriculteurs américains utilisent au quotidien les nouvelles technologies), Juillet-Août 2002
- [ROU 02b] Roux M. *Les différents types de satellites. Les caractéristiques d'une image satellite*. L'Internet agricole et Nouvelles Technologies (Hors série. Comment les agriculteurs américains utilisent au quotidien les nouvelles technologies), Juillet-Août 2002
- [ROU 02a] Roux M. *Tracer : une condition nécessaire pour exporter*. L'Internet agricole et Nouvelles Technologies (Hors série. Comment les agriculteurs américains utilisent au quotidien les nouvelles technologies), Juillet-Août 2002
- Sanders J., J. Hook, C. Kvien S. Pocknee *Analysis of the benefits of precision irrigation in south Georgia*, nespal.cpes.peachnet.edu, 2002
- [SAR 00] Sarrazin P. *Concepts physiques à la base des techniques de caractérisation des cultures*. Agriculture de précision. Avancées de la recherche technologique et industrielle, Dijon, CEMAGREF-ENESAD, 2000
- [THE 99] Thevenet G. D. Boisgontier *l'agriculture de précision en France : état de la situation et questions posées*. Salon international du machinisme agricole. Mercredi 3 mars 1999. L'enjeu français de l'agriculture de précision. Hétérogénéité parcellaire et gestion des intrants. Paris, www.inra.fr/actualites/DOSSIER/DOC/agrip. 1999, 1999
- [THR 99] Thrikawala S., A. Weersink, G. Kachanoski G. Fox. *Economic feasibility of variable-rate technology for nitrogen on corn*. American Journal of agricultural economy 81, 1999
- [VIN 03] Vincent M.-H. E. Baratte. *Les parcelles surveillées par satellite. Dossier Agriculture de précision*. Réussir Céréales Grandes Cultures (157), 2003

Table des matières

9.1. Introduction	1
9.2. Les outils de mesure de l'hétérogénéité intra-parcellaire du sol et des cultures	3
9.2.1. Caractérisation des hétérogénéités du rendement.....	3
9.2.2. Caractérisation des hétérogénéités du sol.....	4
9.2.3. Caractérisation des hétérogénéités du couvert végétal en cours de culture	5
9.3. Les stratégies et choix tactiques	6
9.3.1. Agriculteur consommateur ou acteur	6
9.3.2. Modulation directe, modulation indirecte.....	7
9.3.2.1. Modulation indirecte	7
9.3.2.2. Modulation directe.....	8
9.4. La construction d'itinéraires techniques modulés	8
9.4.1. Identification des facteurs limitants à l'origine de la variabilité intra- parcellaire des rendements.....	8
9.4.2. Nécessité de raisonner l'ensemble du système de culture	9
9.5. Mise en œuvre et évaluation de la modulation des pratiques	9
9.6. Conclusion.....	10